

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"

ТРІНЧУК ДАНИЛО ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 621.316

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ В
НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗІ ЗМІННИМ
НАВАНТАЖЕННЯМ**

05.09.05 – теоретична електротехніка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Островерхов Микола Якович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», завідувач кафедри теоретичної
електротехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий
співробітник
Подольцев Олександр Дмитрович,
Інститут електродинаміки НАН України, головний
науковий співробітник відділу електроживлення
технологічних систем № 16;

кандидат технічних наук,
Сорокін Дмитро Сергійович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України, старший викладач
кафедри електротехніки, електромеханіки та
електротехнологій.

Захист дисертації відбудеться «21» жовтня 2019 р. о 14:30 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.002.06 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 20, ауд. 3.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий « » вересня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. О. Шостак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нелінійні електричні кола зі змінним навантаженням широко використовуються в автономних електричних транспортних засобах, зокрема, в електромобілях, електробусах, електроскутерах, гіроскутерах, сігвеях, електробайках. Основними фізичними елементами силового електричного кола, що складають основу роботи цих транспортних засобів, є акумуляторна батарея, накопичувач електроенергії на суперконденсаторах, силовий електронний перетворювач та електродвигун. Еквівалентна заступна схема такого електричного кола є складною і складається з котушок індуктивностей, що враховують енергію магнітного поля, конденсаторів, що враховують енергію електричного поля, резисторів, що враховують перетворення електричної енергії у інші види енергії, джерел ЕРС. Окремі елементи еквівалентних схем реальних складових електричного кола вміщують нелінійні індуктивності, конденсатори та резистори. Тому дослідження процесів ефективного перетворення енергії в таких нелінійних електричних колах є однією з важливих задач теоретичної електротехніки.

Значний внесок у розвиток теорії перетворення енергії в електричних колах для створення нових та вдосконалення існуючих електротехнічних пристроїв і систем внесли такі відомі вчені як Шидловський А.К., Щерба А.А., Павлов В.Б., Попов А.В., Шембель О.М., Білогуров В.А. Москатов Є. А., Ткачук В.І., Фейзі Т., Квіцьєн М., Сінг А., Ренхарт В., Магеле К., Піторач К., Буттербах С., Еррера В.І., Гастаньяга Х., Жи Янг, Ю Жанг та інші.

Особливістю режиму роботи електричного кола електротransпортних засобів в умовах міського руху є суттєва кількість перехідних процесів, що обумовлює динамічну зміну навантаження та збільшення втрат енергії в електричному колі. Ще однією характерною особливістю є наявність в електричному колі додаткової протиЕРС електродвигуна, величина та напрямок якої змінюється, суттєво впливаючи на процеси заряду-розряду акумулятора, суперконденсатора та ефективність процесу перетворення енергії. Питання підвищення ефективності перетворення енергії в таких нелінійних електричних колах потребує подальшого дослідження з урахуванням впливу перехідних процесів на роботу джерела живлення та накопичувача електроенергії.

Таким чином, підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням шляхом удосконалення його структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії на основі аналізу енергетичних процесів є актуальним та важливим науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках пріоритетного напрямку «Енергетика та енергоефективність» в ході виконання на кафедрі теоретичної електротехніки державної бюджетної науково-дослідної теми «Методи та засоби структурно-параметричної ідентифікації електротехнічних систем технологічної лінії з виробництва вітчизняного кабелю з полімерною ізоляцією на надвисокій напруги» (ДР № 0116U003716) за планом науково-дослідних робіт

Міністерства освіти і науки України та ініціативної науково-дослідної теми «Методи керування взаємозв'язаними електротехнічними і електромеханічними системами в умовах невизначеності математичної моделі об'єкту» (ДР № 0118U000536). У вказаних роботах автор був виконавцем наукових досліджень з підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах електротехнічних та електромеханічних систем.

Мета роботи і задачі дослідження – підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням шляхом удосконалення їх структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії на основі аналізу енергетичних процесів.

Для досягнення мети поставлені наступні **основні задачі**:

1. Аналіз методів підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах.
2. Розробка математичної моделі нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням.
3. Дослідження ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням.
4. Удосконалення методу підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням.

Об'єктом дослідження є процеси перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням.

Предметом дослідження є ефективність перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням.

Методи дослідження. Вирішення сформульованих у дисертаційній роботі задач досягнуто з використанням теорії лінійних та нелінійних електричних кіл, вирішенням нелінійних диференціальних рівнянь високого порядку методом чисельного розрахунку, методів фізичного та комп'ютерного моделювання. Достовірність отриманих у роботі результатів забезпечується експериментальною перевіркою створених у роботі комп'ютерних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Отримала розвиток теорія нелінійних електричних кіл в частині удосконалення математичної моделі нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням шляхом врахування ступеню впливу параметрів елементів кола на процеси перетворення енергії, що дозволяє досліджувати ефективність перетворення енергії при компромісі між точністю розрахунків та складністю моделі.

2. Отримав подальший розвиток метод аналізу енергоефективності нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням на основі математичної моделі, яка враховує зміну електрорушійної сили електродвигуна, що дозволяє підвищити точність розрахунку енергоефективності під час перехідних процесів.

3. Отримав подальший розвиток метод розрахунку ємності суперконденсатора підключеного паралельно до акумулятора джерела живлення нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням, який

забезпечує мінімальне споживання електричної енергії та підвищення енергоефективності кола.

4. Удосконалено електричне коло джерела живлення, в якому за рахунок секційної системи дозаряду суперконденсатора від акумулятора під час пауз навантаження зменшується час перехідного процесу дозаряду, що дозволяє зменшити середньо квадратичне відхилення струму, електричні втрати в колі та споживання електричної енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням.

Практичне значення одержаних результатів для автономних електричних транспортних засобах полягає у розробці методики вибору структури та розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії нелінійного електричного кола, впровадження якої забезпечує покращення їхньої економічності.

Розроблена та експериментально перевірена математична модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням дозволяє здійснювати аналіз енергоефективності електричних транспортних засобів з автономним живленням: електромобілі, електроскутери, електробуси, гіроскутери, сігвеї тощо.

Створена методика розрахунку ємності суперконденсатора, що підключається паралельно до акумулятора, яка забезпечує мінімізацію споживання енергії електричним колом та дозволяє розробляти більш енергоефективні електричні транспортні засоби з автономним електроживленням (можливе зменшення до 5,1% споживання енергії при відпрацюванні Європейського міського їздового циклу).

Удосконалена структура джерела живлення на основі дозаряду суперконденсатора під час пауз навантаження дозволяє підвищити енергоефективність нелінійних електричних кіл, зменшивши споживання енергії (додаткова економія енергії складає близько 0,14 %). Основною перевагою запропонованого рішення є використання існуючих елементів електричного кола, тому її впровадження не вимагатиме додаткових матеріальних витрат. Параметри удосконаленого електричного кола автономного джерела живлення можуть бути персоналізовано під кожного користувача – водія транспортного засобу – базуючись на тривалості пауз руху, мінімізуючи споживання енергії в конкретних умовах.

Використання методики розрахунку ємності суперконденсатора та удосконаленої системи керування джерелом живлення забезпечує зменшення максимальних ударних струмів через акумулятор, що підвищує надійність роботи електричного кола та збільшує тривалість експлуатації акумуляторної батареї.

Результати виконаних досліджень впроваджено в міжнародній компанії «DelFast» з супероперативної кур'єрської доставки на електробайках, ДП НДІ «Квант» (м. Київ) та в навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Особистий внесок. Наукові положення та результати, що представлені в дисертації, отримані здобувачем особисто. Створення математичної моделі,

проведення досліджень, отримання та аналіз результатів було виконано автором самостійно. Також здобувачеві належить ідея з підвищення енергоефективності кола, що викладена в четвертому розділі. У співавторстві з науковим керівником сформульовані мета і завдання досліджень, висновки. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належить формулювання завдань, описи об'єкта досліджень, аналіз публікацій, отримання та оформлення результатів моделювання та розрахунків.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень за темою дисертаційної роботи докладалися, обговорювалися і отримали схвальні відгуки на Міжнародних науково-технічних конференціях: «IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering» (Lviv, 2017); «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» (м. Київ, 2017); «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2016); «Моделювання в електротехніці, електроніці і світлотехніці» (м. Київ, 2016); «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики» (м. Київ, 2014).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних), 5 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (121 найменування) і трьох додатків. Основний зміст викладений на 155 сторінках друкованого тексту, містить 11 таблиць, 73 рисунки. Загальний обсяг дисертації – 217 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі визначена актуальність теми дослідження, сформульовані мета та задачі дослідження, об'єкт, предмет та методи дослідження. Відмічена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Наведено інформацію щодо зв'язку роботи з науковими темами, апробації результатів та публікацій за темою дисертаційної роботи з визначенням власного внеску автора.

У першому розділі зроблено аналіз робіт та порівняння існуючих методів з підвищення енергоефективності електричних кіл. Проведено порівняння параметрів різних видів фізичних елементів нелінійного електричного кола автономних транспортних засобів: акумуляторних батарей, суперконденсаторів, електронних перетворювачів, електродвигунів та їхній вплив на енергетичні процеси в колі.

В якості джерела ЕРС зазвичай використовуються різного виду акумуляторні батареї, що відрізняються електротехнічними параметрами. Визначено, що найбільш поширеними є літій-іонні акумуляторні батареї за рахунок їх основної переваги – найбільшої кількості запасеної енергії на одиницю маси. Проте вони мають великий внутрішній електричний опір, що призводить до зростання втрат в електричному колі та зниження його

енергоефективності. Для усунення цього недоліку пропонуються низкою авторів різні електричні схеми з паралельним підключенням до акумуляторів батарей суперконденсаторів.

Перевагою суперконденсаторів є велика питома ємність, високі швидкості заряду й розряду та незначна деградація навіть після сотень тисяч циклів заряду/розряду. Основним недоліком суперконденсаторів є м'яка кулон-вольтна характеристика. Напруга на затискачах суперконденсатора змінюється майже пропорційно до його заряду, в той час як напруга на затискачах акумулятора при його розряді наполовину має впасти не більше 5 %. Таким чином, робочою є лише мала частина запасеної в суперконденсаторах енергії. Проте суперконденсатор привертає увагу тим, що його недоліки є «перехресними» до недоліків літій-іонного акумулятора. Тому використання обох елементів в системі живлення може дозволити усунути наведені вади.

Електродвигун обумовлює зміну навантаження електричного кола та дію протиЕРС, величина якої змінюється при зміні швидкості руху транспортного засобу. Серед електродвигунів, що використовуються в електричних колах автономного транспорту, найбільш поширеними є асинхронні двигуни, синхронні двигуни з постійними магнітами та вентильні двигуни, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Зона ефективності вентильного двигуна «протилежна» до зони ефективності синхронного та асинхронного двигуна. Це дозволяє чітко розмежувати сфери доцільності застосування цих видів двигунів. Вентильні двигуни підходять для приводів транспортних засобів, які використовуються на максимумі своїх потужностей (спорт-кари тощо), в той час як для міської їзди вигідніше використовувати асинхронні чи синхронні двигуни з постійними магнітами. Для подальшого дослідження електричного кола вибрано асинхронний двигун, який найбільш розповсюджений та дешевший.

Автономне джерело живлення електричного кола створює ЕРС постійного струму, в той час як електродвигуни з боку навантаження споживають трифазну синусоїдну напругу. Для поєднання цих елементів в одному колі розглянуто та проаналізовано різні схеми інверторів, що перетворюють постійну напругу та струм у синусоїдну. Ще однією проблемою кола є різні значення номінальних напруг акумуляторів, суперконденсаторів та електродвигунів. Для її вирішення проведено аналіз електронних перетворювачів типу DC-DC.

Аналіз досліджень показав, що не зважаючи на широке розповсюдження нелінійних електричних кіл в автономному електротранспорті, їхня енергоефективність залишається недостатньо високою в умовах міського руху. Суттєва кількість розгонів та сповільнень у їздовому циклі транспортного засобу обумовлює значний час роботи електричного кола в перехідних процесах, що характеризується зміною навантаження та протиЕРС, короткочасними процесами заряду/розряду акумулятора та суперконденсатора, значними коливаннями струму. За результатами дослідження сформульовано наукові задачі для вирішення наукового завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений удосконаленню фізико-математичної моделі нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням шляхом урахування зміни електрорушійної сили електродвигуна та впливу нелінійностей елементів під час перехідних процесів, що забезпечує більшу точність при визначенні енергоефективності кола. Модель кола побудована на основі удосконалення та за результатами дослідження існуючих моделей елементів з аналізу впливу їх параметрів на енергоефективність перетворення енергії.

В якості моделі літій-іонного акумулятора використана електрична заступна схема, що зображена на рис. 1.

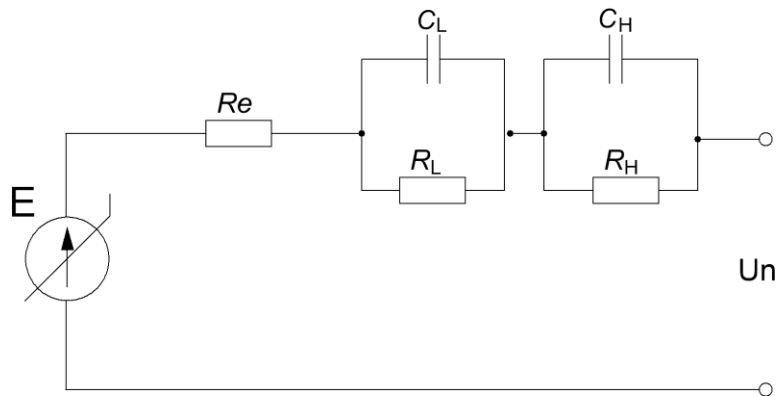


Рисунок 1 – Заступна схема акумулятора:

E – ЕРС акумулятора, величина якої залежить від ступеню заряду, R_e – внутрішній опір акумулятора, C_H , R_H – RC-коло електрохімічної ємності подвійного шару з малою сталою часу, C_L , R_L – RC-коло перехідних процесів, які пов'язані з інтеркаляцією та переносом маси літію, що має велику сталу часу, U_n – напруга на виході акумулятора

Дослідження показали, що нелінійні параметри моделей літій-іонних акумуляторів, мають вплив лише протягом проміжків часу, що значно перевищують тривалість перехідних процесів у досліджуваному колі (десятки секунд), тому цими нелінійностями можна знехтувати без втрати точності розрахунків енергоефективності кола.

Суперконденсатор є нелінійним елементом, ємність якого залежить від його заряду. У якості моделі суперконденсатора обрана заступна схема з трьома паралельними RC-гілками (рис. 2). На цій схемі зображені три ємнісні гілки з різними сталими часу, які зростають зі збільшенням номеру індексу гілки. Ємність $C_V(U_I)$ – лінійно залежна від напруги. Для більшості конденсаторів стала часу першої гілки становить кілька секунд, другої гілки має порядок хвилин, а третьої гілки перевищує 10 хв. Опір R_4 є опором саморозряду суперконденсатора.

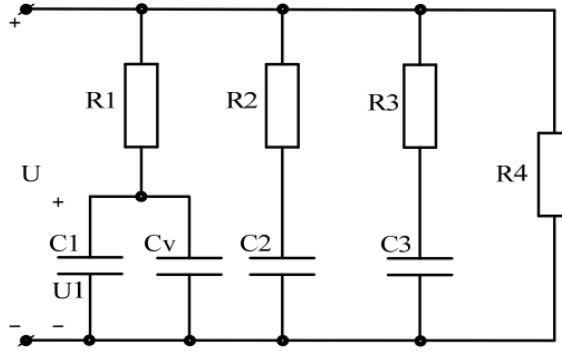


Рисунок 2 – Заступна схема суперконденсатора

У якості моделі асинхронного двигуна взято модель в нерухомих ортогональних d-q координатах, заступна схема якого в проекції на одну з осей зображена на рис. 3. Дана модель не враховує втрат енергії, обумовлених електромагнітними процесами. Для усунення недоліку у заступну схему доданий нелінійний резистор, підключений паралельно до джерела живлення, величина якого змінюється таким чином, аби електрична потужність на ньому дорівнювала втратам.

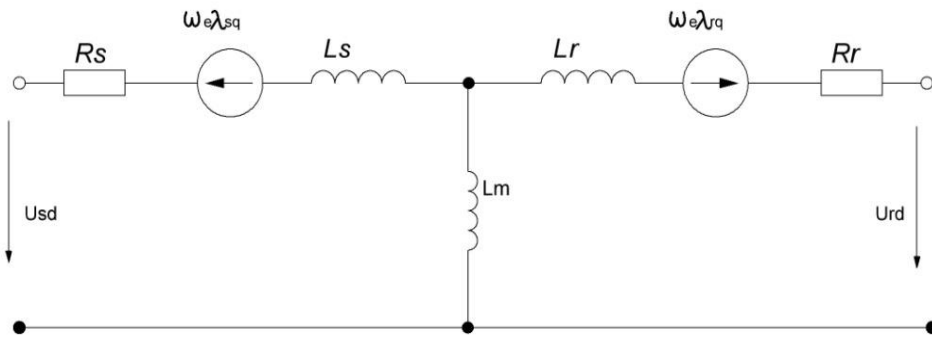


Рисунок 3 – Заступна схема асинхронного двигуна в проекції на вісь d

Система рівнянь математичної моделі асинхронного двигуна представлена у наступному вигляді:

$$\begin{bmatrix} u_{sq} \\ u_{sd} \\ u_{rq} \\ u_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_s & -\omega_e L_s & sL_m & -\omega_e L_m \\ -\omega_e L_s & R_s + sL_s & -\omega_e L_m & sL_m \\ sL_m & (\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + sL_r & (\omega_e - \omega_r) L_r \\ -(\omega_e - \omega_r) L_m & sL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + sL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix}$$

$$T_e = T_L + J \frac{d}{dt} \omega_r$$

$$T_e = \frac{3}{2} p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{rq} i_{sd})$$

де $u_{s(r)q(d)}$, $i_{s(r)q(d)}$ – проекції на вісь d (q) напруги та струму статора (ротора);
 $R_{s(r)}$, $L_{ls(r)}$ – активний опір та індуктивність розсіювання обмотки статора (ротора);

L_m – індуктивність взаємоіндукції обмоток статора та ротора,
 ω_e – швидкість обертання магнітного поля;
 ω_r – швидкість обертання ротора;
 s – оператор Лапласа;
 T_L – момент навантаження на валу двигуна;
 T_e – електромагнітний момент двигуна;
 J – сумарний момент інерції, приведений до валу двигуна;
 p – кількість пар полюсів двигуна;
 $\lambda_{s(r)d}$ – потокозчеплення обмотки статора (ротора) в проекції на d-вісь.

Використано математичну модель силового електронного перетворювача електричної енергії (інвертора) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) та системою завдання вектора напруги живлення електродвигуна. Вхідними змінними системи є сигнали завдання частоти обертання ротора двигуна та величини магнітного потоку. Для математичної моделі перетворювача енергії постійного струму DC-DC взята ускладнена заступна схема з резисторами, опір яких відповідає активним опорам заступних схем котушок індуктивностей та конденсаторів, оскільки саме на них виділяються значні втрати енергії.

На основі уточнених моделей елементів складена математична модель електричного кола, яка на відміну від відомих моделей для дослідження динамічних процесів більш орієнтована на дослідження енергетичних процесів. Розроблена модель враховує параметри елементів, які мають найбільший вплив на енергоефективність кола під час перехідних процесів в умовах швидкої зміни параметрів. В той же час знехтувано параметрами, від яких енергоефективність кола практично не залежить. Дослідження моделей виконувалося в програмному пакеті Matlab/Simulink.

Третій розділ присвячений дослідженню ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням. Дослідження проводилися з метою отримання максимальної енергоефективності кола, а саме мінімального споживання енергії за певний наперед визначений цикл роботи. Результати дослідження дозволили знайти залежність енергоефективності кола від значення ємності суперконденсатора та магнітного потоку електродвигуна. Дослідження здійснювалися на прикладі нелінійного електричного кола електроскутера з номінальною потужністю електродвигуна 2,2 кВт.

Корисним навантаженням транспортного засобу є робота з подолання сили опору рухові. Для дослідження обрано Європейський міський їздовий цикл «The UN/ECE Elementary Urban Cycle» (рис. 4). З даної залежності швидкості транспортного засобу від часу, знаючи параметри електроскутера, отримана залежність потужності від часу, тобто навантажувальна характеристика електричного кола.

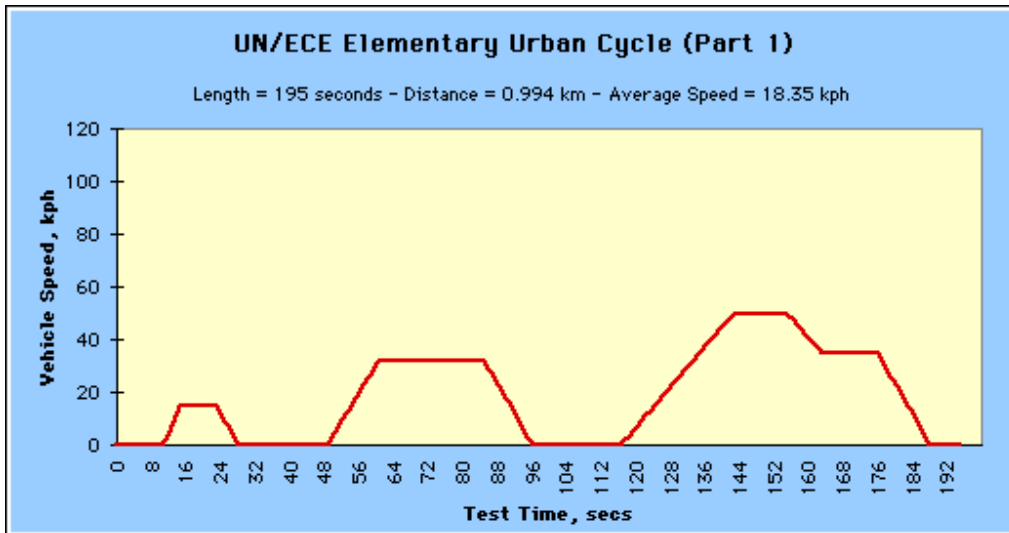


Рисунок 4 – Міський їздовий цикл «The UN/ECE Elementary Urban Cycle»

На рис. 5 зображена заступна схема досліджуваного електричного кола, де: 1 – модель акумуляторної батареї на напругу 370 В; 2 – модель батареї суперконденсаторів, ємність якої в дослідженнях змінювалась від 0,3 Ф до 2 Ф; ШІМ – перетворювач електричної енергії (інвертор) за принципом широтно-імпульсної модуляції; 3 – однофазна заступна схема асинхронного двигуна; R_n – опір навантаження, значення якого визначається з умов міського їздового циклу, R_m – нелінійний резистор, що моделює втрати енергії, викликані електромагнітними явищами в електродвигуні.

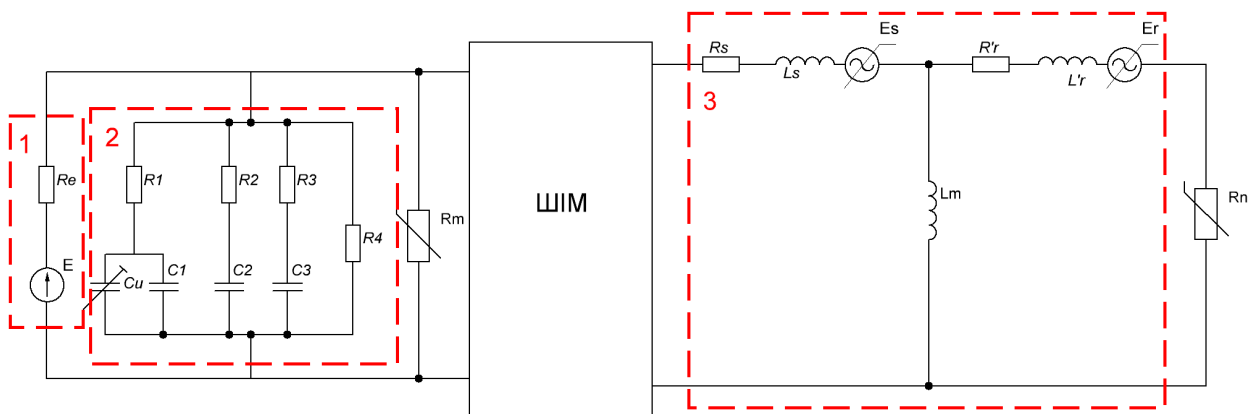


Рисунок 5 – Заступна схема нелінійного електричного кола електроскутера

Для перевірки адекватності даної моделі були проведені експериментальні дослідження на макетній установці. Результати експерименту підтвердили її адекватність.

В моделі застосовується система завдання амплітуди та положення вектора напруги живлення асинхронного двигуна, що дозволяє задавати дві незалежні входні змінні: швидкість обертання ротора та значення магнітного потоку двигуна. Швидкість обертання ротора двигуна жорстко прив'язана до міського їздового циклу, тому є можливість змінювати тільки значення магнітного потоку. Дослідження залежності ККД нелінійного кола від

величини магнітного потоку двигуна при різних швидкостях електроскутера показали, що найбільший ККД має місце при максимально-допустимому (номінальному) магнітному потоці (рис. 6). Даний висновок відрізняється від випадку живлення кола від електричної мережі, коли в деяких режимах є доцільним понижувати магнітний потік для отримання вищого ККД. Ця різниця визначається тим, що наявність великого електричного опору автономного джерела живлення обумовлює електричні втрати в колі, які є суттєвішими за магнітні, а отже понижувати останні за рахунок підвищення перших стає не вигідним.

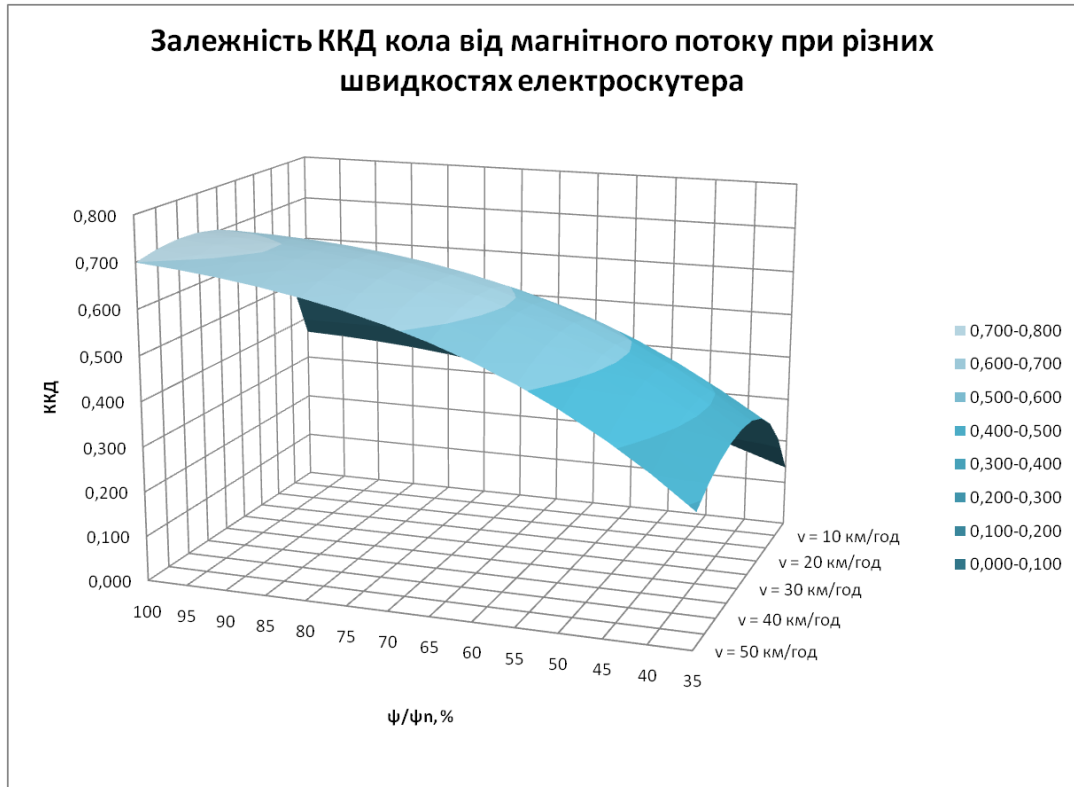


Рисунок 6 – Залежність ККД кола від магнітного потоку електродвигуна при різних швидкостях електроскутера

Ще одним параметром, від якого залежить енергоефективність кола, є ємність батареї суперконденсаторів. В якості енергоефективності тут розуміється не ККД електричного кола, а кількість спожитої енергії за певний проміжок часу (міський їздовий цикл). Справа в тому, що при обчисленні ККД за «корисну» потужність береться робота з подолання опору рухові, яка збільшується зі зростанням маси транспортного засобу. Оскільки встановлення батареї суперконденсаторів збільшує масу електроскутера не збільшуючи «корисну» роботу, то величина ККД перестає бути показовою, в той час як кількість спожитої енергії залишається суттєво важливим параметром.

Аналіз досліджень показав, що використання батареї суперконденсаторів, паралельно підключеної до акумулятора, призводить до зменшення споживання електроскутером енергії за міський їздовий цикл (рис. 7). Існує певне значення ємності суперконденсатора, яке є раціональним в нелінійному електричному колі з енергетичної точки зору. При встановленні

меншої ємності суперконденсатори за час розгону електроскутера розряджатимуться до занадто низьких значень напруги, що призведе до зростання струму, а значить і втрат. При встановленні більшої ємності додаткові переваги будуть незначні – зростатиме маса транспортного засобу і відповідно збільшуватиметься споживання енергії. Для даного електричного кола раціональна ємність суперконденсатора склала 0,725 Ф, при якій споживання енергії зменшується на 3,89 %.

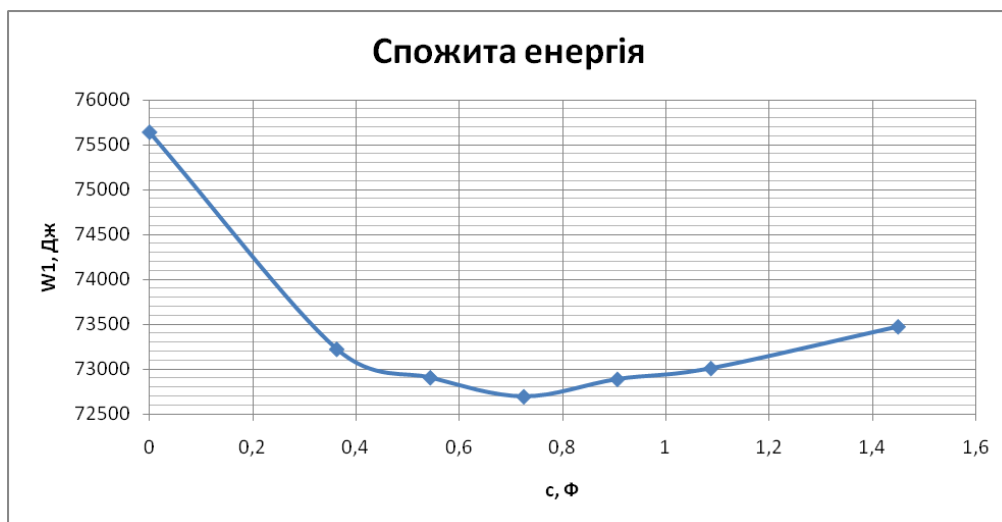


Рисунок 7 – Залежність спожитої за міський їздовий цикл енергії у колі від ємності суперконденсатора

Проведено аналогічне дослідження кола з пониженим значенням напруги джерела живлення. Джерело живлення підключається за допомогою перетворювача DC-DC, який підвищує напругу до необхідного значення на вході інвертора. Не зважаючи на відносно низький ККД перетворювачів DC-DC, їх використання може бути обумовлене конструктивними вимогами (економія місця). Досліджувалось джерело живлення номінальною напругою 24 В, а ємність конденсаторів обиралась в межах від 650 Ф до 2000 Ф.

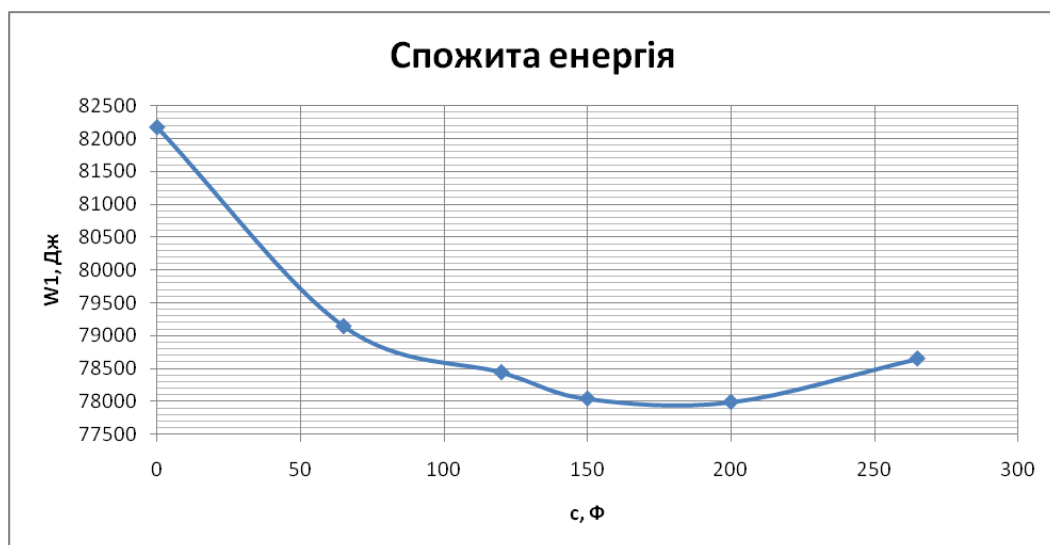


Рисунок 8 – Залежність спожитої за міський їздовий цикл енергії у колі з DC-DC від ємності суперконденсатора

Отримана для цього випадку залежність спожитої за міський їздовий цикл енергії від ємності батареї суперконденсаторів за своїм виглядом схожа на аналогічну для схеми без перетворювача DC-DC (рис. 8). За рахунок можливості підбору більш раціональних параметрів батареї суперконденсаторів зменшення спожитої за цикл енергії сягнуло 5,09 % (при цьому спожита енергія все рівно більша, ніж у випадку без DC-DC, у зв'язку з низьким ККД останнього).

Четвертий розділ присвячений удосконаленню методу підвищення енергоефективності нелінійних електричних кіл зі змінним навантаженням шляхом покращення структури джерела живлення.

Результати дослідження попередніх розділів дозволили виявити недолік у структурі джерела живлення. При відпрацюванні міського їздового циклу суперконденсатор під час руху електроскутера розряджається до певного значення напруги, але під час пауз з нульовим навантаженням (зупинка електроскутера) не встигає дозарядитись до свого початкового стану (рис. 9). Внаслідок цього кожний наступний розгін електроскутера відбувається при стартовій напрузі суперконденсатора нижчій за необхідне значення. Це призводить до того, що більша частина навантаження припадає на акумулятор, і як наслідок зростають втрати на активному опорі останнього. Для вирішення проблеми створена спеціальна система дозаряду суперконденсатора, яка заряджає його до початкового значення напруги за очікуваний час паузи руху.

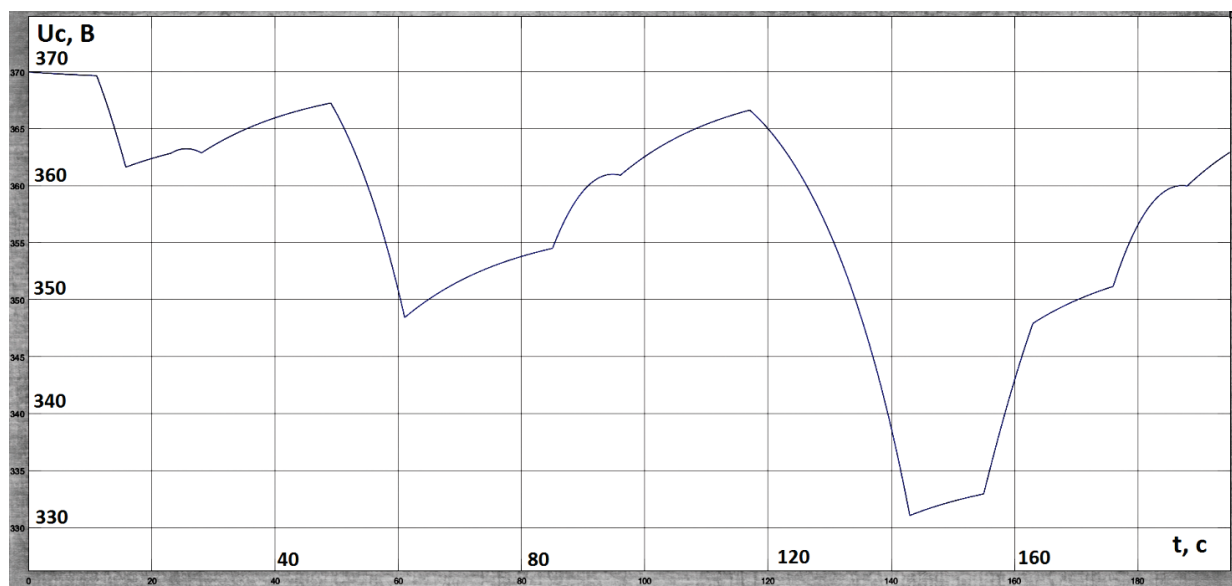


Рисунок 9 – Залежність напруги суперконденсатора при відпрацюванні електроскутером міського їздового циклу

Для її реалізації батарея суперконденсаторів розділяється на дві однакові за ємністю секції. В моменти дозаряду змінюється з'єднання секцій із послідовного на паралельне. Для обмеження зростаючого у більш ніж 6 разів струму заряду суперконденсатора використовується L-фільтр та ШІМ. Причому в якості ключів для ШІМ застосовуються вже використані в схемі ключі. Розроблена формула, за допомогою якої визначається необхідне значення струму дозаряду суперконденсатора:

$$I_1' = \frac{(k_{CV} \cdot k_{cn} \cdot E + C_1) \cdot k_{cn} \cdot E - (k_{CV} \cdot U_1 + C_1) \cdot U_1}{t_n}, \quad (2)$$

де I_1' – струм дозаряду, до якого обмежує ШІМ;

$k_{cn} \approx 0,995$ – коефіцієнт спаду напруги, який враховує спад напруги на акумуляторі під час пауз (на підтримання збудження двигуна);

U_1 – величина напруги перед початком паузи;

E – ЕРС батареї акумуляторів;

C_1 – постійне значення ємності суперконденсатора;

k_{CV} – коефіцієнт залежності ємності суперконденсатора від напруги;

t_n – тривалість паузи.

Єдиним невідомим у цій формулі є тривалість паузи. Можливе використання середнього очікуваного значення паузи. При впровадженні такої системи цей час для кожного транспортного засобу може виставлятися індивідуально чи/та автоматично.

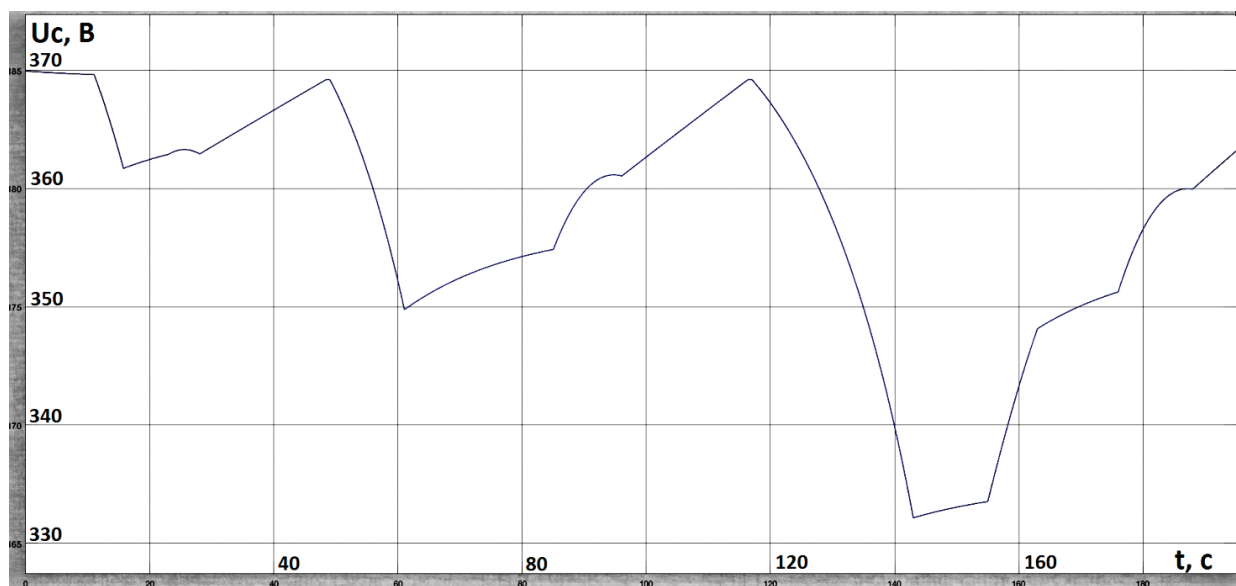


Рисунок 10 – Залежність напруги суперконденсатора при відпрацюванні електроскутером міського їздового циклу та використанні системи дозаряду суперконденсатора

Дослідження показали, що при використанні розробленої автором системи дозаряду суперконденсатор за час пауз дозаряджається до початкового значення напруги (рис. 10). При використанні такої системи економія енергії зростає з 3,89 % до 4,0 % (рис. 11).

Схожий результат був отриманий і для кола з джерелом живлення пониженої напруги. В такому випадку економія енергії покращилася з 5,09 % до 5,23 %.

Подібні результати на перший погляд здаються незначними. Але варто відмітити, що досягаються вони виключно схемотехнічними рішеннями: система дозаряду суперконденсатора використовує вже встановлені компоненти електричного кола. Тобто, невелика економія енергії отримана без

будь-яких втрат у інших показниках транспортного засобу, а отже цей результат має цінне науково-практичне значення.

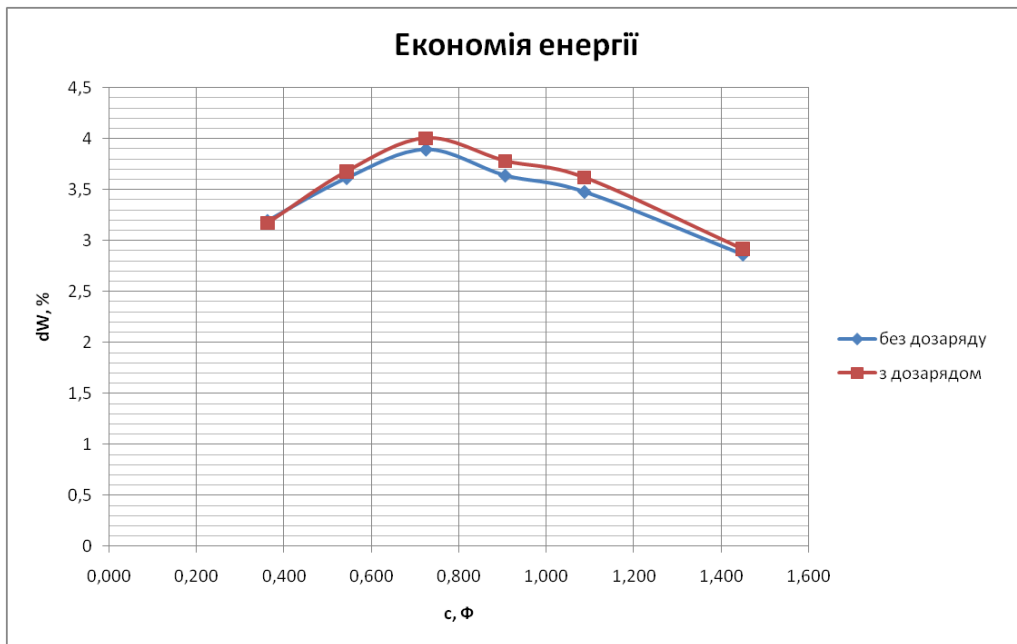


Рисунок 11 – Залежність зменшення споживання електроенергії від ємності суперконденсатора при використанні системи дозаряду та без неї

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання – підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням шляхом удосконалення вибору його структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення та накопичувача електроенергії на основі аналізу енергетичних процесів. Отримані наукові результати мають важливе значення для розвитку теоретичної електротехніки в напрямку визначення ефективності перетворення енергії в електричних колах електротransпортних засобів із живленням від акумуляторних батарей.

Основні результати досліджень узагальнені наступними висновками:

1. Аналіз методів підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах показав:

а) літій-іонні акумулятори, які найбільш широко застосовуються у якості джерел ЕРС таких електричних кіл, мають значний внутрішній електричний опір, що обумовлює зменшення ККД, зростання втрат в усьому електричному колі та пониження його енергоефективності;

б) електричне коло містить також протиЕРС електродвигуна, величина якої змінюється в ході перехідних процесів обумовлених частими розгонами та сповільненнями транспортного засобу в умовах міського руху, причому це джерело працює як в режимі споживача так і генератора електроенергії, впливаючи на енергоефективність електричного кола;

в) для покращення ефективності нелінійних електричних кіл використовуються різні схеми підключення до акумулятора суперконденсатора, як ефективного накопичувача енергії, що має високу швидкість заряду й

розряду та велику питому потужність, проте питання визначення ємності суперконденсаторів та схем їх заряду й розряду в колі з автономним електромеханічним перетворювачем потребують додаткових досліджень;

г) існуючі математичні моделі нелінійних електричних кіл зі змінним навантаженням не враховують повний перелік нелінійностей, не враховують особливість зміни ЕРС заступної схеми електродвигуна, містять недостатньо точні математичні моделі акумуляторів в поєднанні з накопичувачами енергії на суперконденсаторах, що не дозволяє дати адекватний висновок про енергоефективність таких кіл;

д) заступні схеми основних елементів електричного кола: акумулятора, суперконденсатора, силового електронного перетворювача, електродвигуна містять нелінійності, що значно ускладнює дослідження енергоефективності кола аналітичними методами в умовах великої розмірності розрахункової моделі, що обумовлює використання чисельних методів та моделювання для дослідження ефективності перетворення енергії в таких колах.

2. Розроблена математична модель нелінійного електричного кола зі змінним навантаженням для дослідження енергоефективності кола враховує нелінійності джерела на основі літій-іонного акумулятора та накопичувача енергії на основі суперконденсаторів, а також нелінійності електродвигуна та електронних силових перетворювачів (інвертор, DC-DC). Модель також враховує різні схеми підключення суперконденсаторів до джерела живлення, динамічну зміну значення і напрямку ЕРС й магнітні втрати електродвигуна, дискретний характер формування його напруги живлення за допомогою силового електронного перетворювача.

3. Розроблена математична модель дає змогу дослідити ефективність перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням в динамічних режимах в залежності від реальних умов роботи кола електротранспортних засобів, параметрів пасивних та активних елементів, в тому числі від ємності суперконденсаторів та схем їх підключення до джерела. Кількість спожитої електричним колом енергії залежить від значення ємності суперконденсатора, підключеного паралельно до акумулятора. Існує певне значення ємності, за якої споживання енергії при відпрацюванні заданого навантаження є мінімальним. Для досліджуваного кола електроскутера при відпрацюванні Європейського міського їздового циклу ця ємність становить 0,725 Ф за напруги живлення 370 В та 200 Ф за напруги живлення 24 В при використанні DC-DC перетворювача. Споживання енергії менше за аналогічне коло без суперконденсатора на 2,9 кДж або 3,89 % для напруги живлення 370 В та на 4,19 кДж або 5,09 % для напруги живлення 24 В.

4. Удосконалення методу підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійному електричному колі зі змінним навантаженням шляхом вибору раціональної структури та розрахунку параметрів джерела живлення і накопичувача енергії на суперконденсаторах дозволяє зменшити споживання колом електроенергії при відпрацюванні одного і того самого графіку навантаження. Використання покращеної системи розподілу живлення, суть якої полягає у прискореному дозаряді суперконденсатора під час пауз

навантаження, дозволяє додатково зменшити споживання електричним колом енергії на 110 Дж або 0,14 % при відпрацюванні транспортним засобом міського їздового циклу. Перевагою запропонованого методу при його технічній реалізації є використання існуючих елементів електричного кола, тому впровадження не вимагатиме додаткових матеріальних витрат.

5. Використання наукових результатів дисертації дозволяє підвищити енергоефективність електричних транспортних засобів з нелінійними електричними колами зі змінним навантаженням на стадії проектування шляхом вибору раціонального значення ємності суперконденсатора, а також покращити енергоефективність існуючих засобів завдяки застосуванню удосконаленої структури джерела живлення. Параметри удосконаленого електричного кола автономного джерела живлення можуть бути персоналізовано під кожного користувача – водія транспортного засобу – базуючись на тривалості пауз руху, мінімізуючи споживання енергії в конкретних умовах. Використання раціональної ємності суперконденсатора та удосконаленої системи керування джерелом живлення забезпечує зменшення максимальних ударних струмів через акумулятор, що підвищує надійність роботи електричного кола та збільшує тривалість експлуатації акумуляторної батареї.

6. Результати виконаних досліджень впроваджені в міжнародній компанії «DelFast» в роботі з мінімізації споживання енергії в нелінійних електричних колах електробайків за рахунок використання методики підбору конфігурації джерела живлення, ДП НДІ «Квант» (м. Київ) в частині застосування методів числових розрахунків нелінійних електричних кіл з автономними регульованими електромеханічними перетворювачами енергії, навчальний процес кафедри теоретичної електротехніки КПІ ім. Ігоря Сікорського шляхом доповнення розділу «Нелінійні електричні кола» навчально-методичного комплексу дисципліни «Теоретичні основи електротехніки».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., Трінчук Д. Я. Дослідження енергоефективності нелінійного електричного кола з автономним живленням на прикладі привода скутера // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія «Механіко-технологічні системи та комплекси». – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 4(1176). – С. 109-115. *Здобувачем запропонована комп'ютерна модель нелінійного електричного кола та проведений її аналіз методом числових розрахунків.*

2. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., Трінчук Д. Я. Ефективність перетворення енергії в нелінійному електричному колі електроскутера, що працює на міський їздовий цикл // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 27(1249). – С. 249-253. *Здобувачем запропонований вибір навантаження для нелінійного електричного кола та проведений аналіз його комп'ютерної моделі методом числових розрахунків.*

3. Островерхов М. Я., Реуцький М. О., Трінчук Д. Я. Дослідження ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера в залежності від системи живлення та навантаження // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2017. - №3. – С. 51-55. *Здобувачем отримані залежності ефективності перетворення енергії в приводі електроскутера від системи живлення та навантаження методом чисельних розрахунків.*

4. Ostroverkhov M., Trinchuk D. Study into Energy Efficiency of the Drive of Electric Vehicles with an Independent Power Supply Depending on the Configuration of the Power Source // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2018. – № 4/1 (42). – Р. 45-50. (**Index Copernicus**). *Здобувачем отримані залежності ефективності перетворення енергії в приводі автономних електричних транспортних засобів від конфігурації системи живлення методом чисельних розрахунків.*

5. Ostroverkhov M., Reutskyi M., Trinchuk D. Study of the Induction Motor Electric Drive Efficiency in Transients during their Acceleration // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2018. – № 5/1 (43). – Р. 23-27. (**Index Copernicus**). *Здобувачем отримані залежності енергоефективності перехідних процесів електропривода на базі асинхронного двигуна від часу наростання напруги живлення методом чисельних розрахунків.*

6. Островерхов М. Я., Трінчук Д. Я. Дослідження енергоефективності приводу електричних транспортних засобів з автономним живленням із суперконденсатором з використанням перетворювача постійного струму // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – Одеса, 2018. – Вип. 29(105). – с. 58-65. *Здобувачем отримані залежності ефективності перетворення енергії в приводі автономних електричних транспортних засобів з використанням перетворювача постійного струму від конфігурації системи живлення методом чисельних розрахунків.*

7. Ostroverkhov M., Trinchuk D. The Mathematical Model of a Nonlinear Electrical Circuit with an Independent Controllable Electromechanical Energy Converter // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2019. – № 1/1 (45). – Р. 39-43. (**Index Copernicus**). *Здобувачем запропонована математична та комп'ютерна моделі нелінійного електричного кола з автономним регульованим електро механічним перетворювачем енергії.*

Тези доповідей на наукових конференціях:

8. Trinchuk D. Analysis of the Efficiency of Energy Transformation in Induction Motor Electric Drives with Independent Power Supply. // *IEEE International young scientists forum on applied physics and engineering*. – Lviv, 2017. – Р. 24-27.

9. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. Дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення в транспортних установках на прикладі привода електроскутера // *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах*. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 1/2016 (4). – С. 75–77. *Здобувачем запропонована комп'ютерна модель нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення та проведений її аналіз методом числових розрахунків.*

10. Реуцький М.О., Трінчук Д.Я., Дешко А.О. Застосування суперконденсаторів у приводі електромобіля на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики – Київ, 2014. *Здобувачем проведено дослідження енергоефективності привода електромобіля на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням методом числових розрахунків.*

11. Реуцький М.О., Шинкаренко В.Ф., Дешко А.О. Трінчук Д.Я. Електромеханічний комплекс для дослідження машин постійного струму // Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів, студентів. Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики – Київ, 2014. *Здобувачем запропоновані модель та електрична заступна схема електромеханічного комплексу для дослідження машин постійного струму.*

12. Островерхов М.Я., Реуцький М.О., Трінчук Д.Я. Використання Комп'ютерного моделювання для дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення на прикладі електроскутера // Шоста міжнародна науково-технічна конференція. Моделювання в електротехніці і світлотехніці. – Київ, 2016. *Здобувачем проведено дослідження робочих режимів нелінійного електричного кола з автономним джерелом живлення на прикладі електроскутера методом числових розрахунків.*

АНОТАЦІЯ

Трінчук Д. Я. Підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2019.

Робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання з підвищення ефективності перетворення енергії в нелінійних електричних колах зі змінним навантаженням на прикладі електричного кола електроскутера шляхом удосконалення його структури та методу розрахунку параметрів джерела живлення.

Розроблена математична модель враховує нелінійності електричного кола та зміну навантаження, дозволяє досліджувати енергоефективність кола. Адекватність моделі підтверджена експериментом.

Для досягнення мінімального споживання енергії при відпрацюванні змінного навантаження за європейським міським їздовим циклом існує певне раціональне значення ємності суперконденсатора для електричних кіл з джерелом живлення як високої, так і пониженої напруги. Удосконалений метод підвищення енергоефективності кола шляхом вибору раціональної структури джерела живлення дозволяє зменшити споживання енергії та не вимагає використання додаткових елементів.

Ключові слова: енергоефективність, змінне навантаження, нелінійне електричне коло, паралельне з'єднання акумулятор-суперконденсатор.

ABSTRACT

Trinchuk D. Y. An increase of the energy efficiency conversion in nonlinear electric circuits with time varying load. – Qualifying scientific work as manuscript.

The thesis submitted in fulfillment of the Candidate of Science (PhD) in Engineering degree on specialty 05.09.05 – «Theoretical Electrical Engineering». – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», MES of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis is devoted to solving the actual scientific problem of increasing the efficiency of energy transformation in nonlinear electric circuits with time varying load by the example of an electric scooter power circuit by means of improvement of the structure and method of calculating the parameters of power supply.

The section 1 is devoted to the review of the scientific works on the topics referring to the topic of the research.

The most common source of electromotive force (EMF) of nonlinear electric circuits with time varying load is Li-Ion accumulators. They have large impedance which decreases their efficiency. It leads to the increasing of heat losses in the electric circuit and decreases its efficiency as the whole. The circuit also includes EMF source of the electromechanical converter, the magnitude of which changes rapidly during the transients, caused by frequent accelerations and decelerations of the vehicle in a city.

In order to improve the efficiency of the nonlinear electric circuits different designs of supercapacitor connections to the accumulator are used since supercapacitor is the effective energy storage device that has high recharging speed and power density.

Existing mathematical models of such circuits do not take into account all the nonlinearities, do not respond to the specialty of the varying EMF, include not accurate enough mathematical models of accumulator-supercapacitor connections, all together obstruct making the adequate conclusion about the efficiency.

Analysis of disadvantages exhibits the actuality of the problem of increasing the efficiency of nonlinear electric circuits with time varying load by the means of improvement of the structure and the method of calculating the parameters of power supply and energy storage device on the basis of analysis of transients and stable modes.

In the section 2 a mathematical and computer model of nonlinear electric circuits with time varying load is developed. This model stands out by being more accurate in the calculating of the circuit efficiency by the means of taking into account electromechanical converter's EMF rapid changes of magnitude and influence of nonlinearities during transients.

The model of induction motor (IM) in static orthogonal coordinates, chosen as basis for the mathematical model of electromechanical energy converter, is not accurate enough as it does not consider magnet losses in the IM. In order to calculate

these losses the nonlinear resistor is added to the circuit in-parallel to the converter or power supply.

The research of mathematic model of Li-Ion accumulator has shown that the influence of the most of nonlinear parameters is considerable only in time periods that exceed the transients in the circuit under consideration. In order to simplify the mathematical model of the circuit the accumulator nonlinearities can be neglected without decreasing in accuracy. The serial connection of an ideal source of EMF and a resistor can be used as adequate model of the accumulator for this research.

The model of supercapacitor with three parallel RC-circuits with a nonlinear capacitance in one of them is chosen for the research.

The complicated model of the inverter that considers the significant impedances of the elements is chosen for the model of the circuit.

In the section 3 the research of the efficiency of energy transformation in nonlinear electric circuits with independent controllable power supply is concluded. The results of the research helped to find the relation between the circuit efficiency and the capacitance of the supercapacitor.

Equivalent circuit of the nonlinear electric circuit with time varying load is designed. It considers the magnetic losses of the electromechanical converter with the help of nonlinear resistor. The designed equivalent circuit is verified on the experimental setup.

The rational value of the supercapacitor capacitance exists with which the energy consumption in the circuit is the lowest. For the given electric scooter circuit on the European urban driving cycle load the supercapacitor rational capacitance with the lowest energy consumption is 0.725 F on the voltage of 370 V. The decreasing of the energy consumption in comparison to the circuit without supercapacitor is 3.89 %. Considering the circuit with the usage of additional secondary power supply of lowered voltage, the result is similar: the supercapacitor capacitance for the lowest energy consumption is 200 F on the voltage of 25.9 V, which resulted in the energy economy of 5.09 %.

In the section 4 the improvement of the method of the increasing of the energy transformation in nonlinear electric circuits with time varying load is provided.

The structure of the power supply in accumulator-supercapacitor system is modernized. The power distribution system creates the possibilities for the supercapacitor recharging to its maximum voltage in the periods of zero loads (vehicle stops). Without this system supercapacitor does not make the recharging in time before the new load applies and the following transient of the acceleration starts with the lowered voltage which creates additional energy losses. The main advantage of the proposed system is the usage of already implemented elements of the electric circuit which means there is no need of additional financial expenses. Implementing of this system makes it possible to decrease the energy consumption by additional 0.14 %.

Keywords: accumulator-supercapacitor in-parallel connection, energy efficiency, nonlinear electric circuit, time varying load.

Підписано до друку 18.09.2019 р. Зам. № 1030.
Формат 60х90 1/16. Папір офсетний. Друк – цифровий.
Наклад 100 прим. Ум. друк. арк. 0,9.
Друк ЦП «КОМПРИНТ». Свідоцтво ДК №4131 від 04.08.2011 р.
м. Київ, вул. Предславинська, 28
095-941-84-99, 067-209-54-30
email: komprint@ukr.net